

УДК 550.388.2

## АВТОМАТИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ИОНОГРАММ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

*Е.Ю. Зыков, А.Д. Акчурина, А.Н. Сапаев, О.Н. Шерстюков*

### Аннотация

В статье описывается система автоматической обработки ионограмм вертикального зондирования. Была разработана программа для обработки и интерпретации ионограмм, полученных ионозондами семейства «Циклон», созданными в Казанском государственном университете. Тестирование алгоритма автоматической обработки ионограмм показало, что он может корректно определять значения ионосферных параметров более чем в 90% случаев.

**Ключевые слова:** ионосфера, ионозонд, автоматическая обработка ионограмм.

---

### Введение

При исследовании ионосферы возникает ряд задач, решение которых невозможно без организации автоматизированной обработки информации о состоянии ионосферы. Ионограмма, или высотно-частотная характеристика, – один из самых распространенных источников информации об ионосфере, представляющий собой набор точек, каждая из которых имеет координаты: частоту зондирующей радиоволны и действующую высоту отраженного импульсного сигнала. При отражении от ионосферных слоев на ионограммах образуются следы отражений, представляющие собой непрерывные последовательности точек. При автоматической обработке ионограмм ставится задача подбора в отдельные последовательности точек, образующих на ионограмме линии – следы отражений от различных слоев ионосферы. Очевидным препятствием к этому будут помехи, при которых алгоритм может работать неустойчиво. Следующим, не менее сложным, шагом является интерпретация следов отражения и отсчет по ним параметров ионосферных слоев.

Учитывая сложность обработки и интерпретируемости ионограмм, а также и разнообразие и специфичность методов цифровой обработки изображений, необходимо иметь некоторые наборы алгоритмов, предназначенные для реализации каждого этапа обработки изображений, а как следствие, для каждой конкретной ионограммы – выбор оптимальной последовательности их выполнения, то есть необходима предварительная классификация исходной информации для выбора наилучшего (с точки зрения определенного критерия) алгоритма (или нескольких алгоритмов), реализующего данный этап (этапы).

Особо следует остановиться на проблеме выбора информативных признаков как некоторых интегральных характеристик исходной информации. Выбор подобного набора статистических признаков очень плохо поддается формализации и зачастую граничит с искусством. В случае обработки ионограмм в качестве таких признаков можно выбрать следующие факторы:

- априорная геофизическая информация: время года, время суток, географическое местоположение, солнечная активность и т. п.;
- общие интегральные характеристики самого изображения: гистограммы, соотношение сигнал/шум, числовые оценки амплитуды;

- корреляция исходного изображения с определенными эталонами.

Существуют алгоритмы, для которых имеется строгое математическое описание, но наряду с ними есть и эмпирические, эвристические методы, обычно разрабатываемые экспертами в ходе их работы по мере приобретения практического опыта и не поддающиеся четкой алгоритмизации. В нашем случае мы как раз и имеем дело с таковыми [1].

Таким образом, сложность поставленной задачи является «сдерживающим» фактором при практической реализации алгоритмов автоматической интерпретации ионограмм.

## 1. Современные методы интерпретации ионограмм

Рассмотрим подробнее методы обработки и интерпретации ионограмм, применяющиеся в современных ионозондах.

Основным методом обработки ионограмм до сих пор продолжает оставаться метод вращающихся, или трафаретных, масок. При использовании этого метода выбрана двухэтапная процедура: на первом этапе формируется набор теоретически возможных вариантов решения, а на втором этапе путем соотнесения каждого варианта с реальными данными выбирается наилучший вариант. Работу этой процедуры можно наглядно представить в виде последовательного накладывания на ионограмму трафаретных масок, выделяющих для анализа часть изображения определенной конфигурации. Достоинством данного подхода является то, что при анализе информации осуществляется ее обобщение и, как следствие, меньшая чувствительность к различного рода помехам. Таким образом, если полезная информация различима на фоне имеющихся помех, то она будет выделена. Для этого еще необходимо, чтобы правильный вариант попал в набор проверяемых и чтобы способ определения качества маски не давал неверных результатов.

Указанный метод применяется в таких современных цифровых ионозондах, как «Парус», «Бизон» и «Digisonde» [2, 3].

Имеются и недостатки данного метода: во-первых, известно, что конфигурация маски определяется некоторой функцией, и, следовательно, соотнесение маски с ионограммой есть попытка аппроксимировать реальные данные моделью. Если возникает ситуация, которая не укладывается в рамки модельных описаний, то и в наборе перебираемых масок не окажется истинной. Во-вторых, в процедурах такого рода уже начинает сказываться так называемый «феномен сложности»: теоретическая осуществимость алгоритма сталкивается с практически неосуществимым объемом вычислений. В нашем случае это могло бы произойти, если бы мы исчерпали все возможные методы сокращения объема перебора, так и не достигнув приемлемых значений. С другой стороны, уменьшение объема перебора увеличивает риск того, что в набор не попадет истинная маска. Поэтому нам приходится искать компромисс между двумя противоречивыми требованиями к этой величине.

Таким образом, слабые стороны этого подхода могут приводить к неверным результатам обработки ионограмм. Так, на рис. 1 видно, что алгоритм не справился с интерпретацией слоев, фактически поменяв местами foEs и fxF2.

## 2. Алгоритм экспресс-анализа ионосферных слоев

Для распознавания ионосферных слоев в программе «Cyclon-Rapid» был предложен и реализован метод быстрого анализа ионосферной информации по высотным ( $h'$ ) и частотным ( $f$ ) гистограммным распределениям ионограммы, или гистограммным экспресс-анализом. Предложенный метод отличается намного меньшей

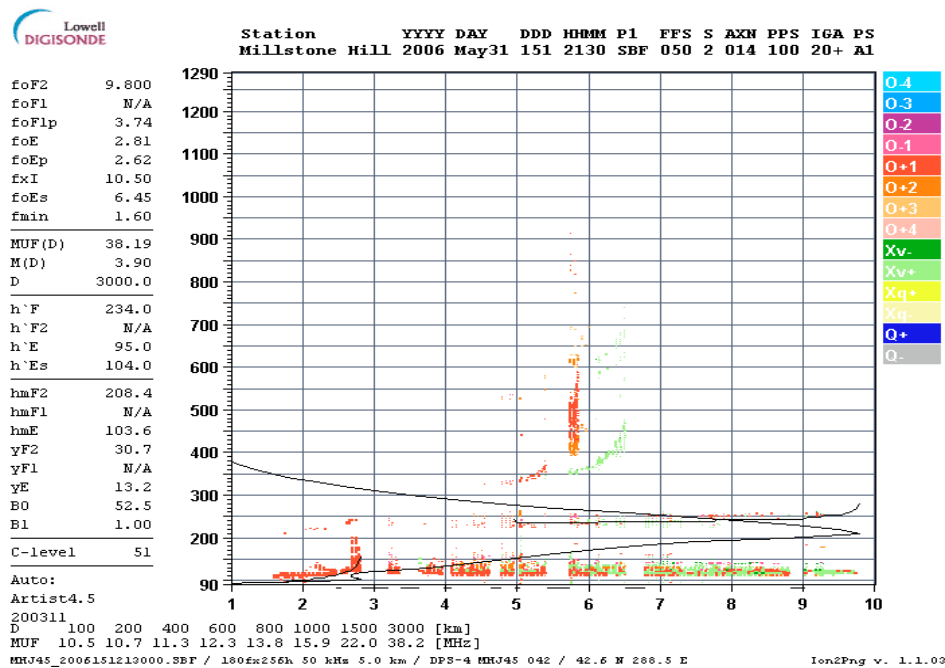


Рис. 1. Пример некорректно обработанной ионограммы при использовании метода трафаретных масок

трудоемкость при практической реализации, связанная с меньшим количеством эмпирических правил, по сравнению с методом трафаретных масок. Программа была написана в виде модулей, встраиваемых в программное обеспечение ионосферного комплекса «Cyclon-M», разработанного в Казанском государственном университете [4, 5]. Средой программирования был выбран Delphi, исходя из требований совместимости с существующим программным обеспечением комплекса.

Преимуществом данного метода является то, что он оперирует с относительно большими областями на ионограмме, а не с отдельными точками, и, следовательно, не так чувствителен к помехам. Такие преимущества особенно проявляются при обработке ионограмм с низким отношением сигнал/шум. Необходимо также отметить, что применявшийся в ионозонде ранее метод составления «шнуров» не мог корректно обрабатывать некоторые ионосферные параметры. Например, он не мог распознавать F-рассеяния. Рассмотрим подробнее работу метода гистограммной обработки.

На предварительно очищенной от шума ионограмме строятся одномерные гистограммы по всему частотному и высотному диапазонам. Полученные ионограммы подвергаются фильтрации сглаживающих (НЧ или вейвлет) фильтров. Случайная сосредоточенная помеха при рассмотрении ее во времени (то есть при рассмотрении отсчетов разных высот одной частотной реализации) проявляет себя в общем случае как гауссовский шум, который, как известно, лучше всего сглаживается простым низкочастотным фильтром. При рассмотрении перехода между реализациями на соседних частотах низкая корреляция между шумовыми помехами эфира приводит к тому, что помеха становится импульсной и лучше всего удаляется медианным фильтром. Таким образом, «анизотропность» шума требует применения разных фильтров для обработки частотных и высотных гистограмм [6].

На следующем этапе высотная гистограмма подвергается разделению на две рабочие области: верхнюю и нижнюю ионосферы. В области нижней ионосферы производятся исследования на предмет обнаружения отражений от области E (слои E и Es), в области верхней – от области F (слои F1 и F2). Рабочие высоты берутся из рекомендаций URSI [7].

На высотной гистограмме области E находится главный максимум (1) (здесь и далее обозначения относятся к рис. 2). Далее от него вверх и вниз по высоте производится исследование гистограммного распределения. Ищутся высоты, для которых на гистограмме сигнал от отраженного следа сходит на нет (амплитуда  $A = 0$  не менее чем на 3-высотных интервалах), и запоминаются минимальное и максимальное значения высот, на которых сигнал еще наблюдается. Для выделенного диапазона высот строится новое локальное частотное гистограммное распределение. Следует обратить внимание на то, что это распределение уже не подвергается фильтрации, чтобы не потерять мелкие детали от отраженного слоя. На частотном распределении, начиная с максимальной частоты, ищется начало отражения от ионосферного слоя. Начало считается найденным, если в окрестности нескольких точек (4-х по умолчанию) присутствует хотя бы одна частота, имеющая ненулевое значение. Таким образом, отсекаются ложные частоты, зашумленные сигналом радиопередающих станций или другими помехами. В массив значений для области E заносится минимальная высота, на которой еще наблюдается сигнал, и найденная критическая частота слоя E, соответствующая максимальной частоте, при которой  $A \neq 0$ . Интерпретация ее будет производиться далее.

Далее на высотной гистограмме области E производится поиск дополнительных максимумов. Если найден локальный максимум (2), процесс построения нового локального частотного распределения и поиск критической частоты производятся аналогично описанному выше алгоритму. Если дополнительный максимум существует, то производится сравнение критических частот на предмет соответствия конкретному ионосферному слою. Большей частоте предварительно присваивается индекс предельной частоты для слоя Es ( $foEs$ ), меньшей – индекс критической частоты для слоя E ( $foE$ ). По таблицам URSI проверяется попадание критической частоты слоя E в диапазон вероятных значений суточного хода слоя E в зависимости от сезона. Если полученное значение  $foE$  превышает это допустимое значение, то данный след интерпретируется как след от слоя Es. В таком случае ранее найденный параметр  $foE$  исключается из массива данных и больше не участвует в рассмотрении. Если полученное значение  $foEs$  лежит в окрестности табличного  $foE$ , а значение  $foE$  много меньше его ( $foEs - foE > 2$  МГц), то принимается гипотеза, что значение  $foEs$  в действительности соответствует  $foE$  и, соответственно, присваивается ему, а прежнее значение  $foE$  удаляется и в дальнейшем рассмотрении не участвует. Если же в высотной области E наблюдается только один гистограммный максимум, то интерпретация следа производится из табличных данных URSI. Если критическая частота располагается в диапазоне табличных данных для слоя E, то параметру присваивается индекс  $foE$ , в противном случае – индекс  $foEs$ . В массив данных заносятся данные критических  $foE$  и/или предельных частот  $foEs$  (3 и 4), а минимальные высоты, где сигнал для этих слоев еще наблюдался, – в соответствующие параметры  $h'E$  и/или  $h'Es$ .

Анализ верхней ионосферы производится аналогичным образом. Рекомендованные значения URSI в данном случае помогают интерпретировать слои F1 и F2 по различным высотам их расположения и существованию слоя F1 в зависимости от времени суток.

Следует отметить, что нахождение критических частот для верхней ионосферы начинается с необыкновенной компоненты  $fxF = foF + 1/2 \cdot \omega H$ , где  $fxF$  –

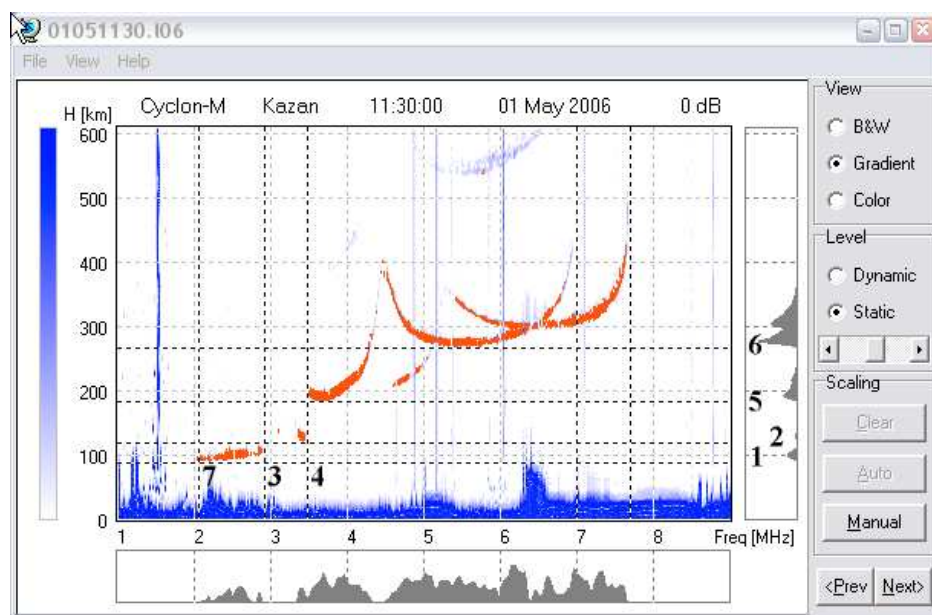


Рис. 2. Ионограмма с распознанными ионосферными слоями

критическая частота отражения необыкновенной компоненты F-слоя,  $foF$  – критическая частота отражения необыкновенной компоненты F-слоя,  $\omega H$  – угловая гирочастота.

Если принимается гипотеза о существовании слоя F1 (5), то на высотной гистограмме в верхней ионосфере находится главный максимум  $h'_{max}$  (6). Если на небольшом расстоянии ( $h'_{max} - h' < 50$  км) вниз от него находится второй по величине максимум, величина которого по крайней мере не меньше половины главного максимума, то принимается гипотеза о том, что главный максимум – отражение от необыкновенной компоненты слоя F1, и в дальнейшем в рассмотрении он не участвует, а второй нижний максимум – от обыкновенной компоненты этого же слоя и становится главным. От главного максимума вниз ищется точка перегиба, которая и принимается за высоту  $h'_{F1}$ .

После нахождения максимальной частоты, на которой происходит отражение от слоя, проверяется наличие следа на частоте  $foF$ . Если сигнал в ее окрестности не наблюдается, принимается гипотеза о том, что найденная критическая частота  $fxF$  на самом деле является помехой от радиопередающих устройств, и производится новый поиск до тех пор, пока одновременно не будут существовать отражения для обеих компонент. Далее  $foF$ - и  $fxF$ -компоненты и минимальное значение высоты, им соответствующее, заносятся в массив данных.

Нахождение  $fmin$  состоит из выделения наиболее низкочастотной непрерывной области соответствующей гистограммы с  $A \neq 0$  (7).

Пример полностью обработанной ионограммы с выделенными областями, приведен на рис. 2.

Значения всех найденных ионосферных параметров, дополненные временем зондирования, заносятся в файл, хранящий суточные измерения. Для визуального контроля за репрезентативностью обработанных данных имеется возможность построения f-графиков из полученного файла.

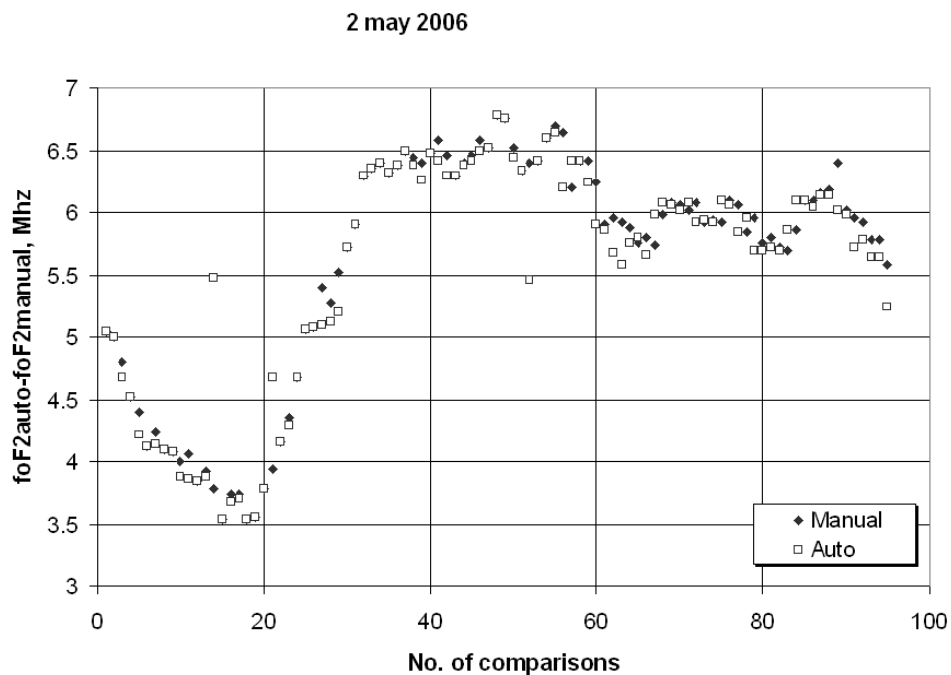


Рис. 3. Пример рядов данных, полученных при автоматической и ручной обработке

### 3. Точностные характеристики метода гистограммного экспресс-анализа

Для количественной оценки точности работы анализатора ряды данных, полученные в результате автоматической обработки сравнивались с аналогичными рядами, обработанными вручную. Пример сопоставления данных, обработанных вручную и автоматом, представлен на рис. 3.

Анализ полученных данных показал, что гистограммный экспресс-анализ позволяет корректно обрабатывать около 80% ионограмм. При этом коэффициент ранговой корреляции по Кендаллу между этими реализациями колеблется в диапазоне  $0.8 \div 0.84$ . Это сравнимо с другими алгоритмами, реализованными в промышленных ионозондах, несмотря на то что, в отличие от комплекса “Cyclon-M”, в некоторых из них реализовано аппаратное разделение обыкновенной и необыкновенной компонент, что сильно облегчает работу программы распознавания.

На рис. 4 приведена сводная гистограмма по частотному распределению ошибок для трех различных программ автоматической обработки. Для сравнения были выбраны следующие программы: Cyclon-Rapid, система автоматической обработки ионограмм Communication Research Laboratory (Ministry of Post and Telecommunications, Япония) [8–10] и программа Autoscala (Italian National Institute of Geophysics and Volcanology, Италия) [11].

Обнаружены следующие недостатки алгоритма:

- повышение количества некорректно обработанных ионограмм при повышенном уровне шума на ионограммах (ночные ионограммы). Рекомендуемый метод устранения: включение встроенного аппаратного аттенюатора в автоматическом режиме по заданному расписанию; предварительное сканирование эфира на предмет исследования шумовой обстановки;

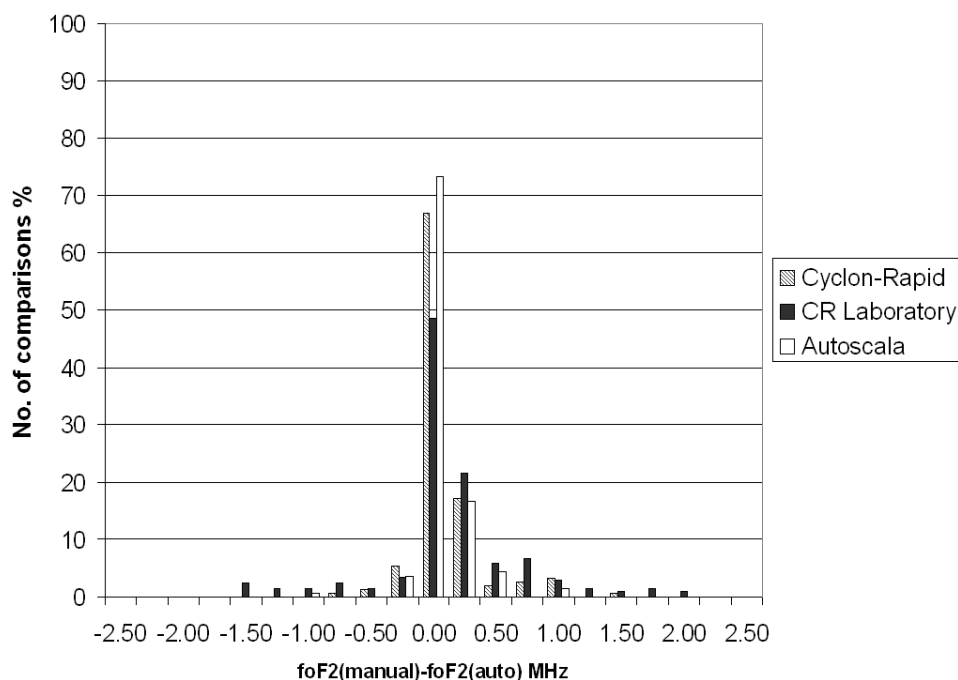


Рис. 4. Сравнение точностных характеристик различных программ обработки ионограмм

- невозможность в ряде случаев корректного распознавания foF1 и foF2. Рекомендуемый метод устранения: использование дополнительной модели распознавания;
- некорректность обработки области F при большом ( $> 2$ ) количестве кратных отражений от слоя Es при большом значении foEs. Рекомендуемый метод устранения: введение дополнительной проверки на количество кратных отражений;
- невозможность корректной обработки при отсутствии отражения от обыкновенной компоненты F2 (редкий случай). Рекомендуемый метод устранения: привлечение оператора.

Дальнейшее усовершенствование экспресс-анализатора для автоматической обработки ионограмм заключается во введении дополнительных алгоритмов, повышающих устойчивость к сбоям при обработке ионограмм с низким соотношением сигнал/шум и/или ионограмм при сильновозмущенной ионосфере. К сожалению, подобные алгоритмы сильно зависят от конкретных случаев и могут вводиться только при возникновении подобной ситуации «по месту».

#### 4. Повышение точности работы экспресс-анализа

Анализ показал, что экспресс-анализатор может давать сбои при наличии сильных кратковременных электромагнитных помех в момент зондирования, при этом, как правило, предыдущая и последующая ионограммы обрабатывались корректно (рис. 5).

Для повышения точности работы экспресс-анализатора в программу “Cyclon-Rapid” был введен логический анализатор. При нахождении ионосферных параметров по алгоритму, изложенному выше, полученные значения на конечном этапе сравниваются с данными, полученными и обработанными во время предыдущего сеанса зондирования. Если разброс между предыдущим и текущим значениями

2 may 2006

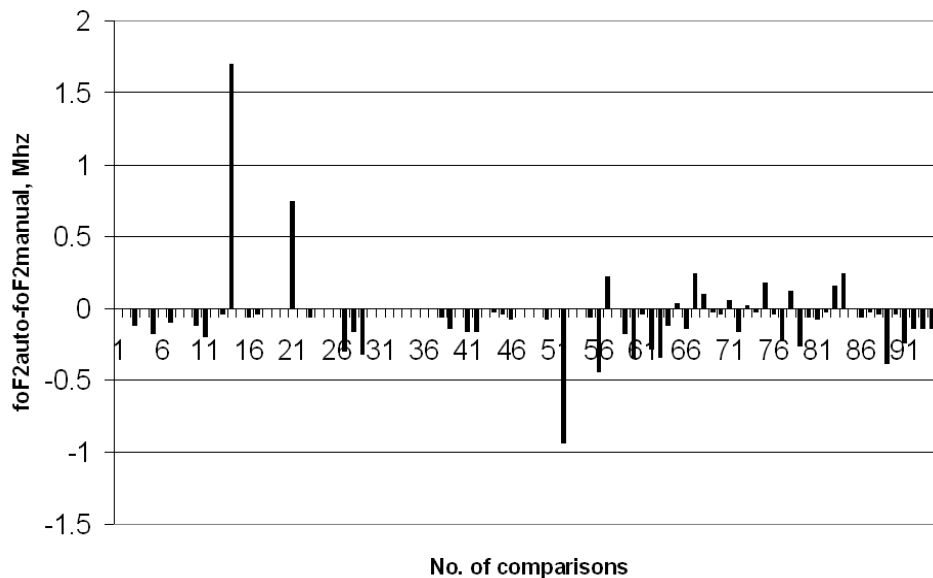


Рис. 5. Последовательность ошибок foF2auto-foF2manual в течение суток (2 мая 2006 г.)

достаточно велик, то производится поиск отражений в окрестности полученных предыдущих значений. Величины доверительных частотных и высотных интервалов меняются в зависимости от исследуемого параметра и сезонного значения. К сожалению, на данном этапе эти значения подбирались эмпирическим образом, исходя из анализа длинного ряда данных, полученных ионосферной станцией в 2004–2006 гг. Таковые интервалы нельзя рекомендовать как универсальные и рекомендованные для использования в условиях ионосферы, отличающихся от среднеширотных. При невозможности нахождения в этих областях отражений загружается подпрограмма ручной обработки и предлагается либо ввести данные самостоятельно, либо согласиться с полученными экспресс-анализатором результатами. Данное дополнение позволяет не только снизить погрешности измерений анализатором, но и существенно повысить репрезентативность полученных данных путем привлечения оператора в затруднительных случаях.

Применение логического анализатора позволяет отследить и устранить около 80% встречающихся ошибок, которые описаны выше.

## 5. Выводы

Разработанная и реализованная в Казанском государственном университете программа автоматической обработки и интерпретации ионограмм не уступает аналогичным программам, использующимся в современных цифровых ионозондах. Анализ работы алгоритмов позволяет предположить, что программа имеет резервы для дальнейшей модернизации. Оценены точностные характеристики и приведены рекомендации по дальнейшему усовершенствованию алгоритмов, направленные на повышение качества обработки.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 06-05-65150).



### Summary

*E. Yu. Zykov, A.D. Akchurin, A.L. Sapaev, O.N. Sherstyukov.* Automatic Interpretation of Vertical Incident Ionograms.

This article describes an automatic vertical incident ionogram processing system. Autoscaling software has been designed to scale and interpret the ionograms produced by "Cyclon" series ionosonde. The automatic scaling algorithm test indicates that the algorithm can successfully derive parameters of the ionospheric layers in more than 90% cases.

**Key words:** ionosphere, ionosonde, ionogram autoscaling.

### Литература

1. Емельянов Г.М., Гузеев С.А. Построение интерактивной системы обработки ионограмм // Ионосферные исслед. – М., 1986. – № 40. – С. 12–18.
2. Галкин И.А. Программное обеспечение системы автоматической обработки ионограмм вертикального зондирования. I. Первичная обработка ионограммы. – Препринт СиБИЗМИР СО АН СССР № 20-87. – Иркутск, 1987. – 17 с.
3. Галкин И.А. Программное обеспечение системы автоматической обработки ионограмм вертикального зондирования. I. Интерпретация высотно-частотной характеристики. – Препринт СиБИЗМИР СО АН СССР № 22-88. – Иркутск, 1988. – 13 с.
4. Минуллин Р.Г., Шерстюков О.Н., Сапаев А.Л., Назаренко В.И., Акчуринов А.Д., Зыков Е.Ю. Цифровой ионосферный комплекс «Циклон-9». – Казань, 1994. – Деп. в ВИНТИ 1994, № 1518-B94.
5. Akchurin A.D., Minullin R.G., Nazarenko V.I., Sherstyukov O.N., Sapaev A.L., Zykov E.Yu. The Ionospheric Complex "Cyclon" // Ionosonde networks and stations. Proc. of Session G6 at the XXIV General Assembly of the International Union of Radio Science (URSI). – Kyoto, Japan: National Geophysical Data Center. 1995. – P. 35–36.
6. Jain A.K. Fundamentals of digital image processing. – New Jersey, 1989. – 569 p.
7. Руководство URSI по интерпретации и обработке ионограмм / Под ред. П.В. Медниковой. – М.: Наука, 1977. – 342 с.
8. Nozaki K., Nagayama M., Kato H. Automatic Ionogram Processing System. 1. Data Reduction and Transmission of Ionogram // J. Commun. Res. Lab. – 1992. – V. 39, No 2. P. 357–365.
9. Igi S., Minakoshi H., Yoshida M. Automatic Ionogram Processing System. 2. Automatic Ionogram Scaling // J. Commun. Res. Lab. – 1992. – V. 39, No 2. – P. 367–379.
10. Igi S. Automatic Ionogram Processing System. 3. A New Method of Displaying Ionospheric Characteristics // J. Commun. Res. Lab. – 1992. – V. 39, No 2. P. 381–402.
11. Pezzopane M., Scotto C. The INGV software for the automatic scaling of foF2 and MUF(3000)F2 from ionograms: A performance comparison with ARTIST 4.01 from Rome data // J. Atm. Solar-Terr. Phys. – 2005. – V. 67, No 12. – P. 1054–1062.

Поступила в редакцию  
26.02.08

---

**Зыков Евгений Юрьевич** – ассистент кафедры радиоастрономии Казанского государственного университета.

E-mail: *Evgeniy.Zykov@ksu.ru*

---

**Акчурин Адель Джавидович** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры радиоастрономии Казанского государственного университета.

E-mail: *Adel.Akchurin@ksu.ru*

**Сапаев Андрей Львович** – заведующий учебной лабораторией кафедры радиоастрономии Казанского государственного университета.

**Шерстюков Олег Николаевич** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой радиофизики Казанского государственного университета.

E-mail: *Oleg.Sherstyukov@ksu.ru*